Zeitschrift: Tec21

Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein

Band: 128 (2002)

Heft: 17: Permafrost

Artikel: Bauen auf bewegtem Boden: Problematik vor Lawinenverbauungen im Permafrost

Autor: Thalparpan, Patrik / Moser, Konrad / Phillips, Marcia

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-80416

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.07.2025

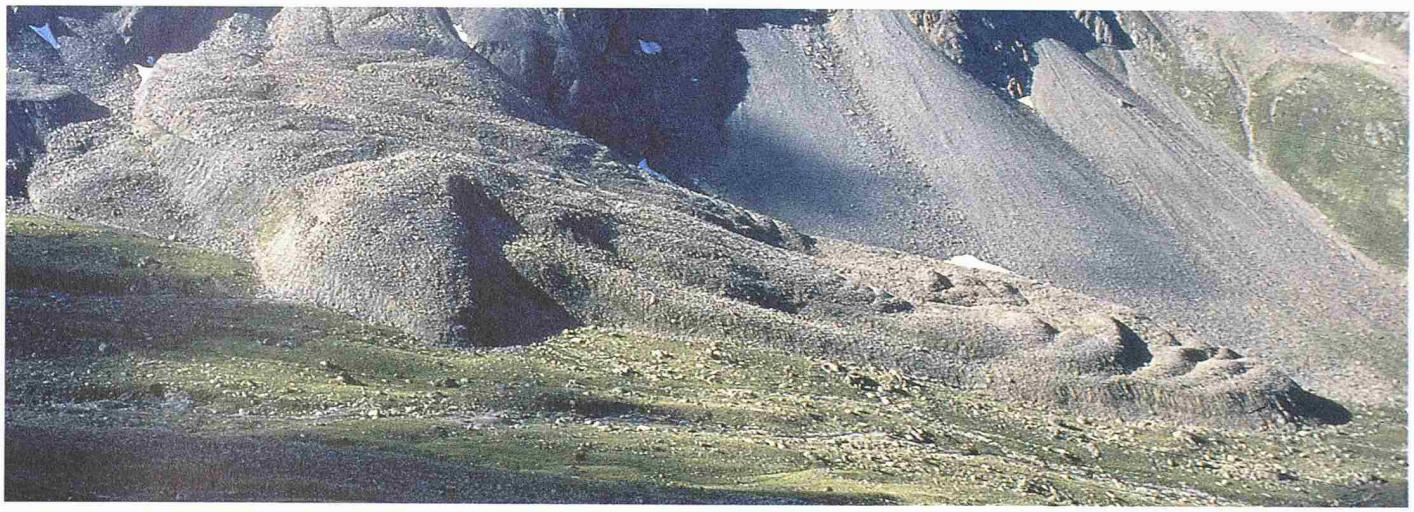
ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Patrik Thalparpan, Konrad Moser, Marcia Phillips

Bauen auf bewegtem Boden

Problematik von Lawinenverbauungen im Permafrost

Lawinenschutzbauwerke sind durch hohe Schneekräfte extremen Belastungen ausgesetzt. Noch schwieriger wird es, wenn auf Permafrost gebaut werden muss. Dieser Untergrund kann mehrere Zentimeter pro Jahr talwärts kriechen und ist ständig, also auch während der Fundationsarbeiten, gefroren. Elastische Verbausysteme und spezielle Ankermörtel heissen die möglichen Antworten.

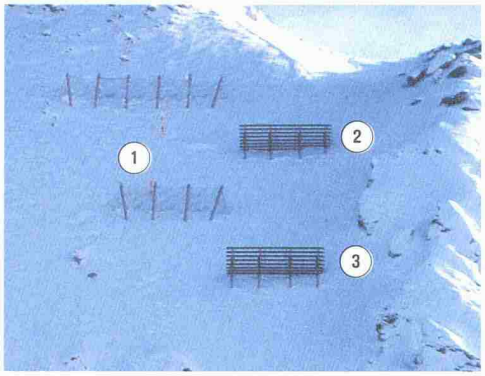


1
Luftaufnahme von im Mittelteil abrutschenden Verbauungen in eisübersättigtem Blockschutt oberhalb Randa (VS) auf 3000 m ü. M. (Bild: Stefan Margreth)

2
Typische Permafrosterscheinung: Blockgletscher am Piz Muragl (Oberengadin) mit seinen einzigartigen viskosen Kriechstrukturen (Bild: Marcia Phillips)

Es wird wärmer. Und das nicht nur jahreszeitlich bedingt, sondern langfristig und global. An dieser Tatsache lassen die Resultate der Klimaforschung eigentlich keine vernünftigen Zweifel mehr zu. Damit droht der in den höheren Zonen unserer Alpen vorkommende Permafrost aufzutauen. Dies kann einerseits Auswirkungen auf die Standfestigkeit der Berghänge selber haben (vgl. vorhergehender Artikel), andererseits werden in diesen Gebieten Lawinenverbauungen erstellt, deren Fundation im Permafrost Schwierigkeiten macht. Permafrost, d.h. ganzjährig gefrorener Untergrund, kommt in den Alpen je nach Hangexposition ab Höhen von etwa 2500 m über Meer vor.

Bestanden die Lawinenverbauungen früher noch aus einfachen Steinmauern, deren Schutzwirkung gegen die Schneemassen beschränkt war, so sind in den letzten Jahrzehnten wesentliche technische Fortschritte erzielt worden. Vor allem die Entwicklung leichter Verbausysteme sowie der Einsatz von Hubschraubern ermöglichen heutzutage den ökonomischen Verbau von hochalpinen Lawinenanrissgebieten.



3

Testverbauungen in einem Schutthang im Permafrost im Oberengadin am Piz Muragl auf 3000 m ü. M.

1: Schneenetze, mit speziellen Fundationstypen (in Zusammenarbeit mit der Industrie entwickelt)

2: gelenkige Schneebrücken (handelsüblicher Typ)

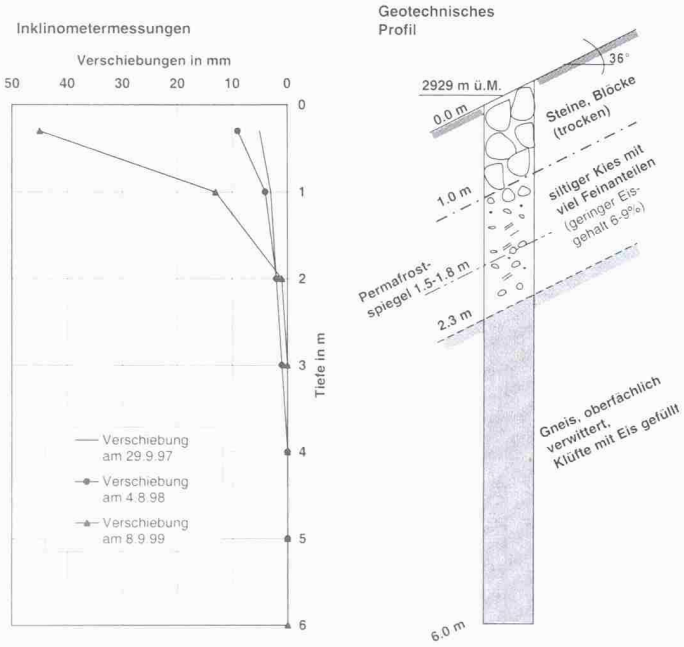
3: einfach verankerter Verbauschlitten (neu am SLF entwickelt)

Charakteristik von Permafrostböden

Kompakter Fels bietet auch im gefrorenen Zustand bei der Erstellung von Bergbahnstationen, Masten, Lawinenverbauungen usw. keine besonderen Schwierigkeiten, da seine Festigkeit durch den Frost kaum negativ beeinflusst wird. Anspruchsvoller ist die Erstellung von Bauwerken, die in Zonen mit gefrorenem *Lockergestein* erstellt werden müssen. Solche Böden, oft sind es steile, karge Schutthalden, kriechen langsam talwärts. Das im Permafrostboden enthaltene Eis ermöglicht diese Bewegung, indem es die Bodenkörner voneinander trennt, diese sich also nicht berühren. Physikalisch gesehen verhält sich vor allem eisübersättigter Hangschutt nicht wie eine starre Masse, sondern vielmehr wie viskoses Material, das der Schwerkraft folgend langsam talwärts kriecht, so wie das Eis eines Gletschers (Bild 2). Kriechbewegungen von mehreren Zentimetern bis Dezimetern pro Jahr werden gemessen. Verbauungen auf diesem kriechenden Baugrund sind deshalb extremen Beanspruchungen ausgesetzt (Bild 1), und entsprechend schwierig ist es, diese so zu konzipieren, dass sie dauerhaft genug sind. Angestrebt wird eine Lebensdauer von etwa 100 Jahren. Gesamtschweizerisch befinden sich sieben bis zehn zukünftige Verbauperimeter im Permafrost, was bei Kosten der Stützwerke von 2000 Fr./lfm einem totalen Investitionsvolumen von etwa 40–50 Millionen Franken entspricht.

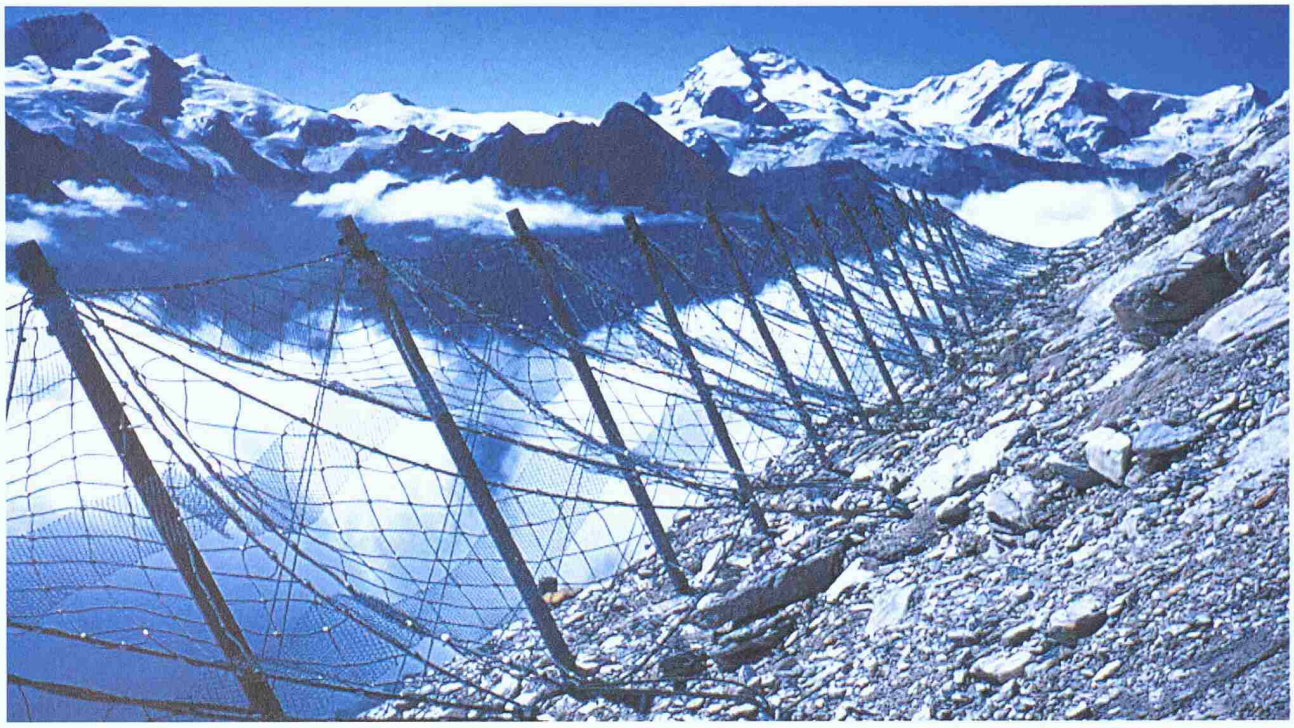
Bauen auf kriechenden Böden

Eine mögliche Herangehensweise wäre, einen kriechenden Hang vor der Erstellung der Lawinenverbauungen zu stabilisieren, z.B. mit tief reichenden Felsankern. Dies steht jedoch wegen der Kosten, die die benötigte hohe Zahl von Ankern verursachen würde, ausser Frage. Flexible Verbausysteme oder Konstruktionen, die wenig empfindlich auf Hangbewegungen sind, standen für die Eignungsprüfung deshalb im Vordergrund. In mehrjährigen Feldversuchen wurden vom Eidgenössischen Schnee- und Lawinenforschungsinstitut Davos (SLF) im Auftrag des Buwal (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft) und der Kantone Wallis und Graubünden verschiedene Verbauungstypen in Permafrosthängen geprüft (Bild 3). Die Testverbauungen wurden während mehrerer Jahre beobachtet, genau vermessen und die Deformationen dokumentiert. Vor allem interessierte das Ausmass der Hangbewegungen als entscheidender Parameter für die Dauerhaftigkeit. Die Hangbewegungen wurden mittels geodätischer Messungen und Inklinometermessungen überwacht (Bild 4). Dabei wurde festgestellt, dass die Schutthalden trotz des in diesem Bereich fehlenden Eises vor allem in



4

Inklinometermessungen im Permafrosthang oberhalb Pontresina. Das oberflächennahe Schuttkriechen beträgt hier einige Millimeter bis mehrere Zentimeter pro Jahr (Bild: Patrik Thalparpan)

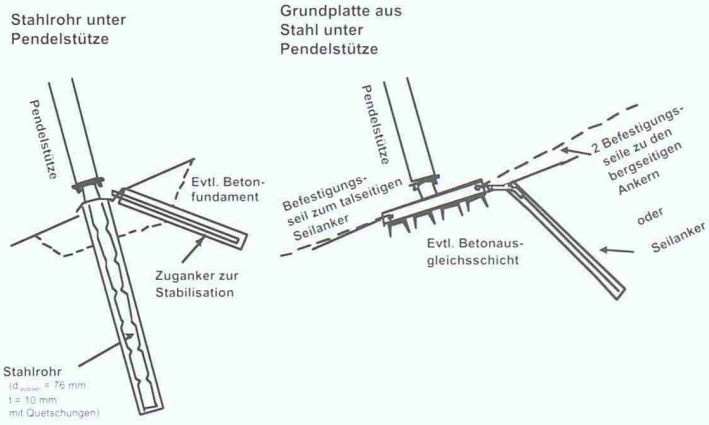


5
Schneenetze im Permafrost oberhalb von Randa (VS) auf 3100 m ü. M. (Bild: Patrik Thalparpan)

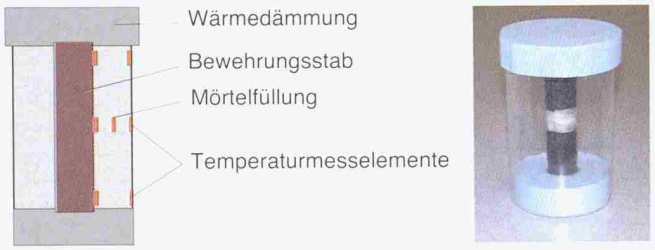
den oberen Metern talwärts kriechen. Dieses Schuttkriechen ist eine Konsequenz des labilen Zustandes, in dem sich Hänge im hochalpinen Gelände oft befinden, da der innere Reibungswinkel des Lockergesteines der natürlich vorhandenen Hangneigung entspricht. Infolge Erosion hinunterstürzende Blöcke können das empfindliche Gleichgewicht stören.

Der Vergleich der verschiedenen Systeme bezüglich langfristiger Eignung ergab für *Schneenetze* die beste Beurteilung. Das äusserst flexible System, eine mit Seilen abgespannte Pendelstützen-Konstruktion, kann sich den Kriechbewegungen anpassen (Bild 5). Entstehen grosse bleibende Deformationen, so lassen sich die Abspannseile neu richten, damit die Kräfte aus dem Schneedruck wieder plangemäss in den Untergrund eingeleitet werden. Da sich die Pendelstützen infolge von Hangbewegungen relativ stark schräg stellen können, wurde eine Fundation entwickelt, die mit Zugankern im Hang gehalten wird (Bild 6).

Natürlich stossen auch derartige flexible Systeme bei allzu grossen Kriechbewegungen längerfristig an ihre Grenzen, und es ist in diesen Fällen mit einer stark verminderten Lebensdauer bzw. mit einem erhöhten Unterhaltsaufwand zu rechnen. Es lässt sich festhalten, dass bei Kriechraten von mehr als fünf Zentimetern pro Jahr der Verbau mit Stützwerken im Anbruchgebiet finanziell zu aufwändig wird. In solch extremen Verhältnissen, wie sie z.B. häufig auf Blockgletschern anzutreffen sind, ist ein dauerhafter und bezahlbarer Stützverbau überhaupt nicht möglich. Somit sind alternative Schutzmassnahmen zu planen, wie z.B. Schutzdämme. Oder es werden in Gefahrenzonenplänen Bauverbotsgebiete ausgeschieden.

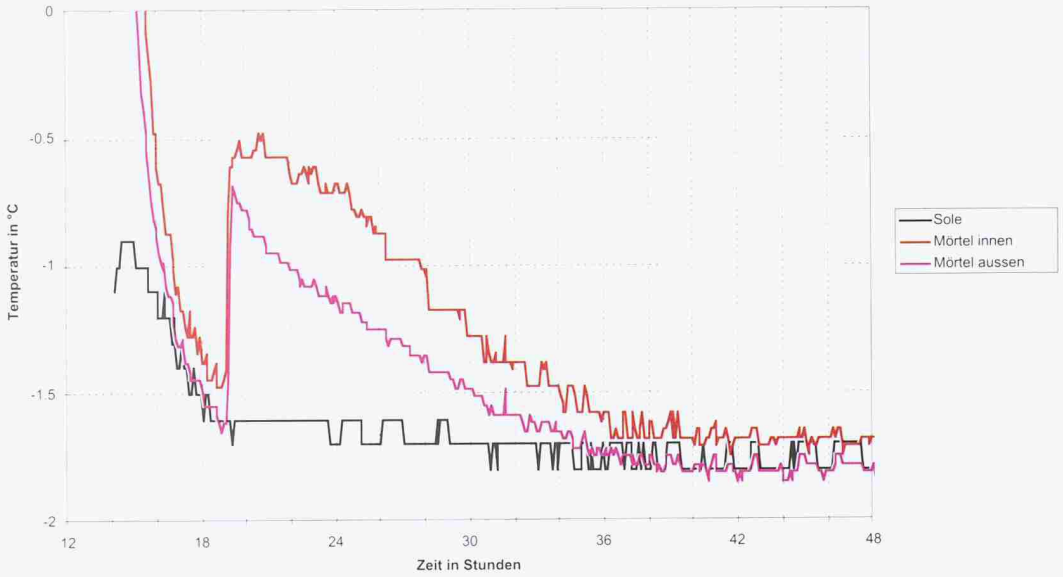


6
Schematische Darstellung zweier möglicher Fundationstypen für Pendelstützen (Bild: Patrik Thalparpan)



7

Schema des Prüfkörpers mit Temperaturmessstellen und leere Schalung eines Prüfkörpers (Bild: Konrad Moser)



8

Typischer Temperaturverlauf beim Abkühlen eines handelsüblichen Mörtels, der vor dem Abbinden gefriert. Der starke Temperaturanstieg nach 19 Stunden ist auf das Freiwerden der Gefrierwärme zurückzuführen (Bild: Konrad Moser)

9

Typischer Temperaturverlauf eines schnell abbindenden Ankermörtels. Die Temperatur bleibt vor der Hydratation immer über dem Gefrierpunkt. Der nach 15 Stunden zu beobachtende Temperaturanstieg erfolgt wegen der frei werdenden Abbindewärme (Bild:-... Konrad Moser)

Mörtel im Permafrost

Nach heutigem Stand der Bautechnik werden Lawinenverbauungen normalerweise tief fundiert, d.h. dass Mikropfähle und Seilanker eingesetzt werden. Dieser Entscheid ist vor allem wirtschaftlich bedingt, weil die genannten Fundationsarten vergleichsweise «leichtgewichtig» sind und sich damit die teuren Helikoptertransporte minimieren lassen. Das Abbindeverhalten der dabei verwendeten Injektionsmörtel ist eine weitere Frage, die im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes untersucht worden ist. Dazu wurden Teilstücke der Seilanker im Labor der Empa nachgebildet und unter verschiedenen Versuchsbedingungen geprüft. Variiert wurden bei den Versuchen folgende Parameter:

- Vorlagerungstemperatur des Mörtels (5°, 15° und 20°C)
- Vorlagerungstemperatur des Anmachwassers
- Bohrlochtemperatur

Die Versuchskörper bestanden aus einem Kunststoffbecher mit rund zehn Zentimetern Durchmesser, in den ein Bewehrungsstab gestellt wurde (Bild 7). Der Hohlraum wurde mit Mörtel gefüllt und die Versuchskörper in ein gekühltes Salzwasserbad gestellt, in dem sie 7 bzw. 28 Tage stehen blieben. Dann wurden sie einerseits in gefrorenem, andererseits in aufgetautem Zustand (Lagerung während 24 Stunden bei 20°C) auf ihre Druckfestigkeit und, sofern die Festigkeitsanforderungen erfüllt waren, auch noch auf ihre Frostbeständigkeit geprüft. Anhand der im Mörtel gemessenen Temperaturverläufe konnte festgestellt werden, bei welchen Versuchskörpern während der Hydratation Gefriererscheinungen aufgetreten waren. Im Bild 8 sind Innen- und Aussentemperaturen eines Prüfkörpers mit nicht frostbeständigem Mörtel dargestellt. Die Hydratationswärme ist beim normalen Abbinden in der Abkühlkurve als langsame Erwärmung sichtbar, die Gefrierwärme hingegen wird plötzlich freigesetzt und bewirkt einen markanten Temperaturanstieg im Mörtel, in diesem Fall von rund 1°K. Die Temperaturen fallen danach weniger steil ab als bei der anfänglichen Abkühlung. Dies dürfte auf die in dieser Phase immer noch frei werdende Abbindewärme zurückzuführen sein. Der Effekt ist in der Mitte des Prüfkörpers deutlich stärker als am Aussenrand. Eine Rückrechnung mittels der frei gewordenen Wärmeenergie zeigte, dass 20 bis 30 % des Anmachwassers gleichzeitig in den Eiszustand wechselte. Die resultierenden Frostschädigungen konnten durch Untersuchungen an Dünnschliffen nachgewiesen werden.

Es zeigte sich in dieser ersten Phase des Projektes, dass bei Temperaturen von weniger als – 2°C im Solbad die Hydratationswärme nicht mehr ausreichte, ein Gefrieren des vorgewärmten Mörtels vor der Aushärtung zu verhindern. Die geforderte hohe Druckfestigkeit (f_c = 35 N/mm^2) und die hohe Frostbeständigkeit (FS > 1.5, Verhältnis von vorhandenem zu kritischem Luftporengehalt) konnten mit handelsüblichen Injektionsmörteln nicht mehr erreicht werden. Bei Anwendungen im Lawinenverbau sinken in den höheren Lagen die Bohrlochtemperaturen aber bis auf –3,0°C.

Spezial-Ankermörtel für Anwendungen im Permafrost

Gesucht sind also Mörtel, die schneller hydratisieren und genügend Abbindewärme freisetzen. Auf der anderen Seite muss die Verarbeitungszeit trotzdem so lang sein, dass ein problemloser Eintrag ins Bohrloch möglich ist. Auf Anfrage erklärten sich drei Mörtellieferanten bereit, ihre Produkte zu modifizieren. Zwei Mörtel wurden mit Beschleunigern versetzt, beim dritten handelte es sich um einen Mörtel mit schnell abbindendem Zement (Verarbeitungszeit 15 Minuten), welcher seinerseits durch Zugabe eines Verzögerers modifiziert wurde. Mit diesen Produkten wurden die gleichen Abkühlversuche ausgeführt wie in der ersten Projektphase, jedoch mit einer tieferen Soltemperatur von –4°C. Resultat: Die Temperaturmessungen zeigten eine markante Temperaturerhöhung infolge der Hydratation, und zwar bevor Temperaturen im Gefrierbereich erreicht wurden (Bild 9). Dadurch wurde wie geplant ein Gefrieren des Mörtels vor dessen Festigkeitsentwicklung verhindert.

Auf der Hochgebirgsbaustelle wurden anschliessend noch zwei nochmals leicht modifizierte Mörtel auf ihre Praxistauglichkeit geprüft. Einer der Mörtel entmischte sich teilweise im Pumpentrichter, was zu Verstopfern führte. Das andere Produkt, ein thixotroper (durch Bewegung sich verflüssigender) Mörtel, zeigte das für Ankermörtel im Lawinenverbau erwünschte Verhalten und konnte problemlos in die Versuchsanker gepumpt werden. Er erreichte aber infolge eines zu geringen Luftporengehaltes nur eine mittlere Frostbeständigkeit. Die Druckfestigkeit nach 28 Tagen betrug hingegen sehr hohe 80 N/mm^2. Der Mörtel wurde vom Hersteller nochmals modifiziert und erfüllte in der anschliessenden Laborprüfung alle Anforderungen.[2]

Keine Bodenerwärmung durch Stützbauwerke

Nebst den beschriebenen bautechnischen Fragestellungen wurde der Einfluss der Verbauungen auf die Temperatur im Untergrund wissenschaftlich erforscht. Verbauungen sollen das Temperaturregime im Boden nicht negativ beeinflussen, d.h. nicht durch zusätzlichen Wärmeeintrag das Auftauen des Permafrostes beschleunigen.

Testverbauungen im Oberengadin und solche am Mont Dolin (in Arolla VS, auf 2800 m) wurden zur Messung des Wärmetransfers mit Temperaturfühlern bestückt. Als Referenz wurden in Bohrlöchern ausserhalb des Einflussbereiches der Verbauungen die Bodentemperaturen bis in zwanzig Meter Tiefe gemessen. Die Temperaturmessungen an den Ankern bestätigten, dass praktisch kein Wärmefluss von den Lawinenverbauungen in den Untergrund stattfindet, obwohl die Stahlverbauungen sich unter dem Einfluss der direkten Sonnenstrahlung erwärmen. Die Dauer der täglichen Erwärmung ist zu kurz, um eine Wärmeleitung in den Untergrund zu bewirken. Zudem sind die Verbindungen zwischen den Verbauungen und den Ankern eher schlecht wärmeleitend. Es besteht somit keine Gefahr, dass Lawinenverbauungen Permafrostböden vorzeitig auftauen.

Weiter interessierte die Entwicklung der Schneedecke, weil auch diese einen Einfluss auf die Bodentemperatu-

ren hat. Die Schneehöhe wurde deshalb mit einer automatischen Kamera und mit Schneepegeln beobachtet. Die Messungen haben gezeigt, dass (nicht überraschend) die Schneedecke oberhalb der Stützwerke allgemein mächtiger ist als unterhalb. Computerberechnungen mittels thermodynamischer Finite-Elemente-Simulationen ergaben, dass Lawinenverbauungen langfristig (über Jahrzehnte) durch die veränderte Schneedecke sogar eine leichte Abkühlung des Bodens zur Folge haben können.[3]

Die Richtlinie

Die Resultate dieses Forschungsprojektes sind durch das Buwal und das SFL als ergänzte Richtlinie für den Lawinenverbau im Permafrost herausgegeben worden.[1,4] Darin wird aufgezeigt, wie Lawinenverbauungen im Permafrost dauerhaft erstellt werden können. In kriechenden Hängen sind flexible Schneenetze mit speziellen Fundationen einzusetzen. Der dabei verwendete Injektionsmörtel muss speziell für Bodentemperaturen unter dem Gefrierpunkt konzipiert sein. Ein neuer Abschnitt regelt die Eignungs- und Konformitätsprüfung für die Anwendung von Mörteln im Permafrost.

P. Thalparpan, dipl. Bauing. ETH/SIA, Basler und Hofmann AG, Esslingen (vormals SLF Davos). Projektleiter Studie, pthalparpan@bhz.ch
Dr. K. Moser, dipl. Bauing. ETH/SIA, Empa, Dübendorf, konrad.moser@empa.ch
Dr. M. Phillips, Dr. ès lettres, Géographie Physique, SLF, Davos, phillips@slf.ch

Literatur

1 Buwal, SLF: Richtlinien für den Lawinenverbau im Anbruchgebiet. Eidg. Forstdirektion/ Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung. 1990 / ergänzt 2000. (Bezug: www.schutzwald-schweiz.ch).
2 Moser K.: Ankermörtel im Permafrost, Untersuchungsbericht Nr. 200229, Empa Dübendorf, Abteilung Beton/Bauchemie. 1999, 101 S.
3 Phillips M.: Influences of snow supporting structures on the thermal regime of the ground in Alpine permafrost terrain. Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos, 2000, 146 S.
4 Thalparpan P.: Lawinenverbau im Permafrost. Schlussbericht und Erläuterungen zu den Kapiteln IV und V der Richtlinien für den Lawinenverbau im Anbruchgebiet. Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos, 2000, 91 S.